

УДК 53.097

**К. А. Осинцев^{1*}, И. А. Комиссарова², Е. Д. Крюкова^{*}, С. В. Коновалов¹,
Ю. Ф. Иванов³, В. Е. Громов²**

¹ Самарский национальный исследовательский университет, г. Самара

² Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

³ Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

*kirilloss@yandex.ru

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ1–0, ПОДВЕРГНУТОГО ВОЗДЕЙСТВИЮ ТОКОВЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ПРИ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

В работе был проведен анализ изменения дефектной субструктуры образцов из титанового сплава ВТ1–0 при усталостном нагружении после токовой импульсной обработке и без нее. Выявлены механизмы, ответственные за повышение усталостного ресурса. Токовая импульсная обработка образцов, осуществляемая на промежуточной стадии испытаний, приводит к увеличению усталостной долговечности материала в $\approx 1,3$ раза относительно исходных образцов.

Ключевые слова: токовые импульсы, многоцикловая усталость, титан, дефектная субструктура, усталостная долговечность

**K. A. Osintsev, I. A. Komissarova, E. D. Kryukova, S. V. Konovalov,
Yu. F. Ivanov, V. E. Gromov**

CHANGING THE STRUCTURE OF THE TITANIUM ALLOY VT1–0, EXPOSED TO ELECTROPULSING IN MULTICYCLE FATIGUE

The analysis of the defective substructure of titanium alloy under fatigue loading after electropulsing and without it was carried out. The mechanisms responsible for increasing fatigue life are revealed. Electropulsing of samples, carried out at the intermediate stage of testing increases the fatigue life of the material in ≈ 1.3 times.

Key words: electropulsing, multicycle fatigue, titanium, defective substructure, fatigue life

В современных условиях эксплуатации машин и конструкций проблемы повышения прочности, ресурса, живучести и долговечности материалов выдвигаются в число основных задач. Наиболее ответственные и уникальные изделия, машины и конструкции эксплуатируются в режимах циклических деформаций, определяющих разрушение даже при незначительных нагрузках. В связи с этим возросла актуальность предотвращения усталостных разрушений ответственных деталей (увеличения срока их службы), особенно в тех отраслях, где возникновение аварий ведет к катастрофическим последствиям [1; 2].

Для повышения усталостной долговечности металлических материалов используют различные способы упрочняющей обработки. В последние годы перспективными являются работы, направленные на создание, изучение, совершенствование и практическое внедрение технологических методов поверхностного упрочнения, использующих высококонцентрированные источники энергии, включающие ионные, плазменные, лазерные и электронные пучки, обеспечивающие формирование в поверхностном слое высокопрочных наноструктур.

Целью настоящей работы являлся анализ изменения дефектной субструктуры образцов из титанового сплава ВТ1–0 при обычном нагружении и при нагружении после токовой импульсной обработки и выявление механизмов, ответственных за повышение усталостного ресурса.

В качестве материала исследований были использованы образцы титанового сплава ВТ1–0 следующего химического состава (до 0,18 Fe; до 0,07 C; до 0,04 N; до 0,1 Si; до 0,12 O; до 0,004 H; 0,3 % — другие примеси; остальное Ti, масс. %). Усталостные испытания проводили на специальной установке по схеме асимметричного консольного изгиба. Образцы толщиной 4 мм и шириной 12 мм были изготовлены по ГОСТ 25.502–79 и имели симметричный концентратор напряжений с минимальным сужением в центральной части 5 мм. Температура испытаний — 300 К, частота нагружения образцов изгибом составляла 10 Гц [3].

Исследования поверхности разрушения осуществляли методами сканирующей электронной микроскопии (прибор Tesla BS-301). Анализ фазового состава и состояния дефектной субструктуры материала выполняли методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (прибор JEM-2100). Фольги для исследований готови-

ли методом ионного утонения пластинок, вырезанных электроискровым методом из массивного образца параллельно поверхности разрушения на максимально близком к ней расстоянии.

Установлено, что в результате усталостных испытаний образцов, подвергнутых предварительной токовой импульсной обработке, в сравнительно тонком (не более 4 мкм) поверхностном слое технически чистого титана марки ВТ1–0 формируется субмикроструктурная структура, средний размер кристаллитов которой составляет $422,7 \pm 400$ нм. Следовательно, токовая импульсная обработка образцов технически чистого титана марки ВТ1–0 в процессе усталостных испытаний приводит к многократному увеличению размеров кристаллитов поверхностного слоя. Следующей особенностью зеренной структуры поверхностного слоя является сравнительно большой разброс зерен по размерам. Можно предположить, что причиной этому являются процессы рекристаллизации материала, имеющие место при обработке токовыми импульсами.

Особенностью образцов технически чистого титана марки ВТ1–0, разрушенных в результате усталостных испытаний в условиях токовой обработки, является сравнительно низкий уровень изгиба кручения кристаллической решетки материала. Следовательно, такая обработка технически чистого титана в процессе усталостных испытаний способствует снижению количества источников (концентраторов) внутренних полей напряжений в поверхностном слое материала.

Токовая импульсная обработка образцов, осуществляемая на промежуточной стадии испытаний, приводит к увеличению усталостной долговечности материала в $\approx 1,3$ раза относительно образцов без такой обработки. Установлено, что токовая импульсная обработка технически чистого титана марки ВТ1–0, во-первых, сопровождается многократным увеличением размеров кристаллитов α -титана поверхностного слоя материала, что обусловлено процессами рекристаллизации; во-вторых, способствует снижению количества источников (концентраторов) внутренних полей напряжений в поверхностном слое материала, что обеспечивает снижение потенциально опасных мест трещинообразования; в-третьих, приводит к существенному увеличению размеров частиц окисной фазы, формирующихся в поверхностном слое образцов технически чистого титана при усталостных испытаниях.

Литература

1. Терентьев В. Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов. М. : Интермет инжиниринг, 2002. 287 с.
2. Ботвина Л. Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов. М. : Наука, 1989. 230 с.
3. Комиссарова И. А. Изменение при многоциклового усталости структуры титанового сплава ВТ1–0, подвергнутого токовому импульсному воздействию / И. А. Комиссарова [и др.] // Ползуновский вестник. 2018. № 3. С. 139–143.